

全國中型水利水电工程經驗交流會議叢書

平板壩的設計和施工

湖南省水利水电局編
水利电力部长沙勘测设计院

水利电力出版社

目 录

甲、設計部分	2
一、双江口水庫溢流平板坝的設計	2
(一)緒言	2
(二)設計資料	3
(三)坝址坝型	11
(四)平板坝設計	15
(五)挑射消能与水工試驗	47
(六)結語	52
二、金江水庫平板坝的設計	53
(一)概述	53
(二)地形地質及建筑材料	55
(三)施工方面需要考慮的問題	57
(四)坝型的選擇	57
(五)坝体稳定分析及設計上所考慮的一些問題	58
(六)支墩平面的应力分析	62
(七)垛肩的設計	64
(八)面板的設計	66
(九)分縫設施	67
(十)对基础处理的要求	69
(十一)經驗教訓	72
乙、施工部分	74
一、施工基本情况	74
二、施工程序	79
三、圍水导流	83
四、基础处理和开挖	88
五、鋼筋混凝土施工	99
六、平板坝的測量放样	130
七、施工管理	141

甲、設計部分

一、双江口水庫溢流平板壩的設計

(一)緒 言

双江口水庫建在湘江二級支流九溪河上，位于湖南省浏阳县境內，距长沙市50公里。壩址以上为高山峻岭，山洪陡漲陡落，当地羣众称之为“天晴三天遭干旱，下雨三天水上山”。因之本工程举办目的在于解决 42,000 亩农田的山洪灾害和灌溉問題，并建立小型农村水电站。

壩址为V形峽谷，寬高比为 2:1。壩址地質系泥盆紀砂岩与砂質頁岩互层。壩型为鋼筋混凝土溢流平板壩，最大壩高 41.6 公尺，壩頂軸长 97 公尺，由 11 个支墩和两个岸墩支承 12 跨擋水板所組成，中央三跨长 17.6 公尺，为溢流壩，溢水深 6.1 公尺，单寬流量 32.15 秒公方，采用鼻坎挑流的消能型式。

大壩按三級水工建筑物标准設計，在 1957 年 9 月至 10 月間約 50 天時間內，花費設計力量 495 工日，在边施工边設計的情况下，緊張赶工完成了設計。国庆节大壩开始清基，11 月中开始澆筑混凝土，至 1958 年 3 月中完工。在不到半年的短促時間內就把这座高达 40 余公尺的平板壩 迅速 建立了起来，并且施工質量良好。共計完成工程量混凝土 12,300 公方，鋼筋 325 吨，实花劳动力 12 万工日，全部投資 133 万元（灌区工程另由乡社自办）。

本工程所以能够快速建成，而且达到了“多、快、好、省”的要求，其根本关键是什么呢？参与該工程的建設者們

对于这有着深刻的体会，工程的设计与施工过程就是党贯彻了政治挂帅，解放思想，敢想敢作的思想教育的过程，也就是由于党的坚强领导展开了向右倾保守思想斗争的过程。

现将溢流平板坝的设计简单介绍如下，因时间仓促，所述各节，恐不免谬误殊多，仅供同志们作为参考。

(二)设计资料

1.流域概况:

九溪河(又名猴江)是湘江支流捞刀河的一个分支，流经浏阳县境内，上游分成东南二源，东源流长9公里，南源流长3.1公里，在本工程坝址上游双江口汇合后，流入一高峻而又狭窄的峡谷，峡谷长600公尺，河面宽仅15~25公尺。九溪河流域面积71平方公里，平均比降约20公尺/公里，河窄水浅，从不通船。峡谷上游除一、二村庄外，全属陡削高山，原是比較偏僻荒凉的地方；峡谷下游为宽阔的丘陵平原，但因九溪河暴涨暴落，山洪旱灾均甚严重，屡见不鲜。

坝址选择在猴江峡谷的进口处，水库流域长度11公里，流域面积34平方公里，占九溪河流域面积的40%。

这一地区，以前无水文气象资料，直至1956年8月，首议举办本工程时，始设水文气象观测站，但资料过短，不敷应用，故设计资料系采用长沙(下游44公里)浏阳(上游22公里)两站1952~1956年实测雨量资料，用相关法插补延长得出浏阳站1910~1956年共44年之雨量，作为本水库之水文演算资料。本水库水文特征指标是：

上游流域面积	34.0平方公里
多年平均雨量	1,635公厘
多年平均蒸发量	1,148公厘

多年平均水量	3,640万公方
多年平均流量	1.18秒公方
徑流模數	34.8秒公升/平方公里

一日暴雨造成50年一遇洪峯流量468.2秒公方

一日暴雨造成200年一遇洪峯流量566.0秒公方

工程地区气候温和，浏阳站1951~1956年实测月平均气温为 17.6°C ，此六年間，最高日温 42°C （8月），最低温度 -6°C （元月）。

2. 地質:

水庫及埧址区内地层为泥盆紀之紫色砂質頁岩、薄层砂岩，也有部分藍灰色灰綠色的砂質頁岩。有受过挤压的變質現象，在基岩上面被复有第四紀沉积物。紫色砂質頁岩与砂岩成互层状产出，紫色砂質頁岩含微量云母薄片、氧化鉄等，頗为致密，硬度在4~5級。砂岩呈青灰色，含少量长石及云母、氧化鉄薄层，为砂質胶結，有較大量的石英脉侵入。藍灰色灰綠色砂質頁岩岩性与紫色砂岩类似，但层較薄。

水庫周圍及埧址附近是一个大的背斜构造，傾向均向上游，与河流成斜交，傾角一般在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。埧軸綫位于背斜构造的上翼部分，岩层傾向上游，傾角一般在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之間，傾向不一，时而 S·E·E，时而 N·E·E，以 $S85^{\circ}\text{E}$ 、 $N85^{\circ}\text{E}$ 为多。距埧軸下游40公尺左右为背斜軸，根据埧軸綫槽探結果及清基情况，岩层节理裂隙发育，并間有裂隙承压水。

为具体了解岩层的工程地質与水文地質情况，在埧址附近鑽孔6个，岩心采取率为70~95%，抗压极限强度在567~1480公升/平方公分之間，单位压水率0.0~2.4公升/分，遇到裂隙則漏水太大，并有涌水現象。

根据湖南省財委地震調查組提供的資料，从1487年至今四百多年中，有記載的地震共14次，从現象判断，烈度均在6級以下。

3. 設計条件:

最低河床岩面高程	105.60公尺 (假定零点，以下均同)
最低坝底高程	104.60公尺
第一期正常蓄水位	140.10公尺
安装閘門后正常蓄水位	143.10公尺 (技术設計后期，补充修正规划条件)
水庫死水位(泥沙淤积高程)	115.00公尺
滾水坝頂高程	140.10公尺
滾水淨寬	17.60公尺
擋水坝頂高程	146.20公尺
防浪墙(栏杆)頂高程	147.40公尺
50年一遇溢洪流量	468.2秒公方
庫水位	145.48公尺
尾水位	113.57公尺
单寬流量	26.6秒公方/公尺
溢流水深	5.38公尺
200年一遇溢洪流量	566.0秒公方
庫水位	146.20秒公尺
尾水位	114.90秒公尺
单寬流量	32.15秒公方/公尺
溢流水深	6.1公尺

設計荷重有本重、水压、泥沙压力、地震力四种。

浮托力与风浪压力均小，忽略不計。

按各个构件的计算假定，荷载组合条件可有适当变更。

4. 建筑材料:

(1) 在坝址河床取露天水源，其化验分析成果如表 1。
从水质分析成果来看，本工程环境水对各种水泥均无侵蚀性。

表 1

测定项目	分析成果	备 注
干燥残渣	63毫克/公升	
游离碳酸 (CO_2)	6.16毫克/公升	<16.29 , 无碳酸性侵蚀
氯离子 (Cl^-)	0.75毫克/公升	
氢离子 (PH值)	7.9	>6.7 , 无一般酸性侵蚀
钙离子 (Ca^{++})	28.857毫克/公升	
硫酸根离子 (SO_4^{--})	1.8 毫克/公升	<250 , 无硫酸盐性侵蚀
镁离子 (Mg^{++})	2.5116毫克/公升	$<1,000$, 无镁化性侵蚀
硫化氢 (H_2S)	无	
酸式碳酸盐碱度	1.54毫克当量	对各种水泥均无侵蚀等

说明：混凝土以露天水源结构、断面小于 0.5 公尺为标准。

(2) 国家分配给本工程的水泥有 400[#] 火山灰质硅酸盐水泥 (掺入火山灰质赤页岩 28%) 及 400[#] 矿渣硅酸盐水泥 (掺入矿渣 35~45%) 两种，这两种水泥均系河北唐山最近出厂，活性较高，有的竟达到 500[#] 标准。因此在本工程浇筑过程中，定期检验，作出适当的混凝土配合比设计，以节约水泥。

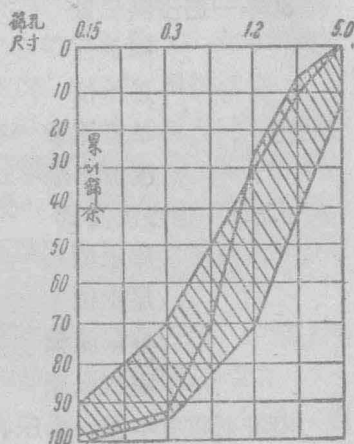


图 1

(3)砂卵石試驗：距坝址下游7公里的彭家滩，河床中盛产河沙、卵石，其試驗成果如表2、3、4及图1。

表2 河砂篩分試驗

篩孔尺寸 (公厘)	分計篩余		累計篩余 %
	克	%	
5	0	0	0
2.5	39.7	7.58	7.58
1.2	103.6	20.72	28.30
0.6	206.5	41.30	69.60
0.3	119.5	23.90	93.50
0.15	24.5	4.90	98.40
底盆	8.6	1.72	
合計	500.6		

表3 河砂試驗成果表

項 目		規 定	成 果
容 重 (公斤/公方)			1,520
比 重			2.61
空 隙 率 (%)		37	41.8
細 度 模 数			3~3.2
平 均 粒 徑			0.51
雜質含量	泥 污 含 率 (%)	2	0.84
	有 机 物 質	淺于标准色	无 色
	三 氧 化 硫	1	定 性 分 析 无
	云 母	0.5	目 測 鑒 定 无

說明：按ГОСТ4797-49对水工混凝土规定的标准。

表 4

卵石試驗成果表

項 目		規 定	成 果		
容 重 (公斤/公方)			(小) 1,618	(中) 1,575	(大) 1,565
比 重		2.3	2.62		
空 隙 率 (%)		45	(小) 38.3	(中) 39.9	(大) 40.5
針狀和片狀顆粒含量 (%)		不作規定	2~3%		
軟 弱 顆 粒 含 量 (%)		10			
雜 質 含 量	泥 污 含 率 (%)	2	0.9		
	有 機 物 含 量	淺于标准色	淺 于 标 准 色		
	三 氧 化 硫	0.5			

說明：1.按ГОСТ4797-49对水工混凝土規定的标准。

2.雜質含量拟以小卵石的試驗成果为标准，因小卵石的雜質含量比大、中卵石为多。

3.針狀及片狀顆粒含量，系三級配40:20:40，及二級配 50:50組合試樣試驗成果。

(4)卵石顆粒級配(見表 5)及含沙率之选定：

表 5

粒 徑 (公分)	大 石	中 石	小 石
2		5~2.5	2.5~0.5
3	10~5	5~2.5	2.5~0.5

卵石組合比用最大組合單位重方法來決定，二級配按 50:50(中石:小石)配合得最大組合單位重 1.71 噸/公方，三級配按 40:20:40(大:中:小)配合得最大組合單位重 1.83 噸/

公方。

含沙率用最大坍落度試驗方法，通过工地实际試拌，当坍落度最大无分崩离析現象时的含沙率为最佳含沙率。

三級配 含砂率为28% } 加气剂用量万分之0.75
二級配 含砂率为32% }

5. 設計规范:

根据苏联水工建筑物設計规范，按Ⅲ級标准确定。

混凝土計算极限强度与安全系数見表 6。

表 6

作用力种类	各种混凝土标号的极限强度 (公斤/平方公分)				各种荷載組合的安全系数		
	90	110	140	200	基本的	基本的和 附加的	基本的附加 的和特殊的
軸心受压 σ_{np}	72	88	108	145	2.1	1.9	1.7
弯曲受压 σ_u	90	110	135	180	2.1	1.9	1.7
軸心受拉 σ_p	10	11.5	13.5	17	3.6	3.3	2.8
弯曲受拉 σ_{pn}	17	19	22	28	3.6	3.3	2.8
剪 切 τ	19	23	27	34	2.75	2.5	2.2

混凝土的抗剪强度沒有一定的规范，也很难作出可靠的試驗。在苏联的鋼筋混凝土结构中切应力的数值不作規定，在一般坝的設計中，常有許多剪切应力的規定，如美国垦务局規定混凝土的剪切强度为抗压强度的一半。同时支墩承受巨大的水平荷重，依靠支墩断面上的剪切应力来保証支墩的抗滑安全，垛肩部分的摩擦齿也完全是由混凝土的剪应力来承担面板重量的，因此限制支墩的安全剪切应力十分必要，而且应規定得偏于慎重与安全。

鋼筋混凝土的安全系数見表 7。

表 7

破 損 的 原 因	荷 載 組 合		
	基本的	基本的和附加的	基本的附加的和特殊的
1. 混凝土到达受压极限或鋼筋达到屈服点			
A、在受压构件	1.8	1.7	1.6
B、在其他构件	1.8	1.7	1.6
2. 混凝土到达受拉极限			
A、抗裂縫或有弯起鋼筋及鋼箍时抵抗受拉主应力		1.2	1.2
B、无弯起鋼筋及鋼箍时抵抗受拉主应力	2.8	2.5	2.2

混凝土及鋼筋混凝土的主要物理特性常数見表 8。

表 8

名 称	常 数 值
側膨脹系数 (柏松比)	1/6
綫膨脹系数	0.00001
混凝土結構的收縮系数	0.0002
鋼筋混凝土結構的收縮系数	0.00015

鋼筋彈性模数与混凝土彈性模数之比值 n 列于表 9。

表 9

混 凝 土 标 号	140	200
比 值 n	15	12

对混凝土、少钢筋混凝土及钢筋混凝土的重要说明。
钢筋混凝土结构中的钢筋含量列于表10。

表 10

混 凝 土 标 号	110~140	170~200
钢筋截面积(百分数)	0.2	0.25

凡受拉钢筋含量以及受压构件的全部钢筋含量小于0.05%时，应按纯混凝土计算。

凡计算所需的钢筋含量少于表10所列百分比，但大于0.05%时，则应按少钢筋混凝土结构计算。少钢筋混凝土结构可按下述原则进行计算：

当受拉钢筋含量小于表10的50%时，断面尺寸的决定与混凝土构件相同，不过安全系数要减小25%，但不得小于2.4；钢筋含量的确定与钢筋混凝土相同，不过安全系数要减小25%，但不得小于1.25。

当受拉钢筋含量大于表10所列数值的50%时，可按钢筋混凝土构件计算。

钢筋因受供应条件限制，来源、规格、性能均很混乱，设计过程中，对钢筋屈服点应力，螺纹钢采用2,850公斤/平方公分，光圆钢筋采用2,500公斤/平方公分，根据后来的拉力试验，螺纹钢为3,500~4,720公斤/平方公分，圆钢为2,545~3,230公斤/平方公分（直径越小，强度越高），除在工地节减钢筋外，螺纹钢的屈服点强度，应采用3,500公斤/平方公分。

(三) 坝址坝型

1. 坝址选择：

九溪河在双江口以上分两支，各支两岸山势雄偉，河谷狹窄，可能坝址有三，牛角弯(左支流)、观前(右支流)、双江口(汇合后)；在双江口以下，沒有更适宜的坝址。在初步設計中曾对上列三个坝址作比較，見表11。

表 11

項 目 \ 坝 址	牛 角 弯	观 前	双 江 口
可 能 的 坝 型	溢流重力坝	溢流重力坝、平板坝	溢流重力坝、平板坝
地 質	砂質頁岩	紫色砂岩，节理发育	砂岩与砂質頁岩互层，节理发育，裂隙多
庫 容 条 件	不好	較好	最好
河谷寬度(公尺)	15	25	20
河 床 复 盖 层	无	无	无
积雨面积(平方公里)	22	8.5	34
交 通 运 輸	困难	困难	較好
施 工 場 地	困难	較好	不好
勘 探 資 料	缺	缺	齐全

根据上表比較，牛角弯坝址地形狹长，庫容条件差；观前坝址控制面积太小，水量不够；加以該两处坝址施工条件均很困难，勘探資料又不齐全，故选定双江口坝址。

2. 坝型比較:

双江口坝址山势陡削，河谷系数(寬高比)为2.1。坝址区内找不到适合的溢洪道，又沒有可供筑坝的土料，在坝址下游7公里之彭家滩有足够之砂卵石，經檢驗可供混凝土料用。对外交通不太方便。此外要求在3月底汛期以前完工，并可能节省劳动力。

根据这些条件，进行坝型的比較选择：

限于建筑材料及地形条件，土坝、堆石坝未曾研究。

首先考虑了溢流拱坝，但在比较过程中发现：(1)从地质鑽探成果知坝址河床为紫色砂岩，致密坚硬，而两岸5~8公尺深一层为风化之砂岩与砂质页岩互层，弹性模数和抗压强度都不均匀，节理裂隙发达，夹有粘土等物，处理比较困难，对单拱坝拱座的要求不太适合；(2)限于河谷宽度，拱坝溢洪水深必需5公尺以上，对于坝身震动及冲刷坝基等，问题均很复杂。隧洞泄洪则施工较难，造价亦高。根据这两项条件，拱坝型式在中途放弃。

坝工滚水坝比较了两种坝型，一为坝顶安装2公尺迭搭式木板活动闸门，一为不设闸门。根据初步计算，采用断面为上游坡1:0.05~0.1，下游坡1:0.75，溢洪段顶宽50公尺，结合地形往下收缩至出口宽为30公尺。并进行稳定性分析、边缘应力分析及工程数量等计算工作，计算条件系按正常高水位、校核洪水位和竣工无水三种情况，计算荷载包括有上下游水压力、泥压力、上托力、自重，忽略了风浪与地震。假定混凝土与砂岩间摩擦系数 $f=0.6$ ，要求安全指标是：

抗滑：设计 $K_{ck} \geq 1.1$ 校核 $K_{ck} \geq 1.0$

防倾：设计 $K_{nop} \geq 1.5$ 校核 $K_{nop} \geq 1.3$

应力：坝面及地基反力均无拉应力出现。

通过上述计算，以不安活动闸门的为代表，与平板坝比较。

平板坝溢流作了两种型式比较：

在初步阶段采用高空挑流的消力戽，技术设计改用滚水坝面型式，前者溢洪口宽47.6公尺，最大单宽流量11.9秒公方，其优点是坝身体积较省，水库洪水位较低2.13公尺，但是由于高空挑流落差只有18公尺，动能不够，挑射不远，常常冲刷坝脚及山坡，必须高过10公尺的消力槛形成水垫，并

将山坡衬护数量很大。后者溢洪口宽17.6公尺，最大单宽流量32.15秒公方，消能可以采用各种型式，因之总的工程数量反比较前者略省，而支墩抗滑稳定与应力分布均有利得多。故以后者为代表，与圪工坝进行全面的比较如下(表12)：

表 12

項目	內 容	平 板 坝	圪 工 重 力 坝
1	坝高(公尺)	41.60	41.60
2	坝体数量(公方)	11,350	34,400
3	水泥(吨)	2,850	4,120
4	钢筋(吨)	320	20
5	模板(平方公尺)	18,000	2,000
6	劳动力(工日)	28万	50万
7	造价(万元)	150	133
8		遇到意外的超高洪水时，安全性较高	不安全
9		坝底浮托力影响极小，可不考虑	影响较大且难考虑正确
10		基础应力较大，但很均匀	基础应力不大，但很不均匀
11		施工技术性高，但劳力省	施工操作简单，劳力多，石块升高困难大
12		场地较易布置	场地较难布置
13		渗水问题较严重，耐久性较差	渗水问题不严重而耐久性较好
14		防空条件：坝身中弹性坏，水库中坝安全	相反
15		施工导流方便	相似
16		坝体散热容易	相似
17		1957年10月1日开工，1958年3月完工	同时开工，1958年5月完工，已到汛期

选择坝型过程中，主要的要求是，劳力要省，工期要短，造价要低，意外洪水要争取抵御。这都为平板坝所具有，根

据本工程实际条件，采用溢流平板坝是较经济合理的。

(四) 平板坝设计

平板坝是各种类型的支墩坝中的一种，其主要特点是可以利用坝上游倾斜面上水的重量，和消除坝基底面上的浮托力来满足坝身抵抗滑动的稳定安全。这就能够大大地节省坝身体积（一般情况，平板坝体积为重力坝体积的30~40%），从而充分利用了材料的强度和解决了大体积混凝土的散热问题。对于某些水文资料缺乏的中小型水利工程而言，平板坝尤其具有抵御超高频率洪水的稳定安全性，因为意外高频率洪峰出现时，坝面上水的重量与横推力相应地增加，而坝基底面的浮托力变化影响极为微小。

平板坝的主要构件是挡水平板与支墩两部分。平板承受水压，传给支墩，通过支墩传给基础。因之平板是梁的作用，而支墩是偏心受压的柱体（薄板墙），支墩一般都很单薄，为了增加其抵抗纵向弯曲和横向倾复的稳定，需在支墩之间布置加劲横撑或肋墙。支墩肩部集中承担着面板的反力，结构应力应属弹性力学的空间问题，最好通过光弹模型试验，也可以简略地按偏心受拉构件计算。此外，平板坝由于各部结构都很单薄，这就必然要考虑它的某些特殊要求，例如平板材料的抗渗性、抗冻性以及水质的化学侵蚀作用；支墩平面尺寸很大，应设置有合理的分缝与分块，使之在干缩或冷缩时不致裂缝；溢流板抵抗高速水流的磨损与震动，经受漂浮物体的撞击和冰冻损伤等都值得注意。

平板坝的施工工作量，比重力坝、大头坝等要少得多，施工导流又极为简便，因之平板坝的施工建筑是比较简便的。但是也正因为平板坝构件单薄，尺寸变化多，清基、放

样、立模板、浇筑混凝土等工序都较复杂，而又必须严格保证质量，因此施工技术性较高。假如我们能进行预制构件安装，则平板坝的施工将具备最优越的条件。

1. 平板坝设计要点：

平板坝的设计要点主要在于坝体外形的选择，包括支墩上下游坡度、支墩间距及坝体各部的断面厚度等三项，最后的决定应该从经济计算比较中选择。

支墩上下游坡度的决定应满足两个要求：第一，必须满足坝身抵抗滑动的稳定性；第二，应尽可能使支墩上游面不出现拉应力或使拉应力在允许范围内。一般认为上游面坡度愈平坦（仰角愈小），利用水重愈大，抗滑稳定性显著提高，但是上游面出现拉应力可能性就愈多，反之亦然。下游面坡度愈平，支墩增长，应力虽明显改善，但对抗滑的有利影响甚小。平板坝上游坡 α 一般是根据基础的摩擦系数 f 而定，当 $f=0.9\sim0.7$ 时， $\alpha=60^\circ\sim50^\circ$ ； $f=0.7\sim0.4$ 时， $\alpha=50^\circ\sim40^\circ$ 。下游坡 β 一般采用 $65^\circ\sim85^\circ$ ，滚水坝为 $45^\circ\sim50^\circ$ ，对滚水坝断面并应结合溢流坝面曲线轮廓的需要。本坝砂岩基础采用 $f=0.6$ ，计算比较了上游 $\alpha=43^\circ、45^\circ、48^\circ、50^\circ$ ，相应的下游坡 $\beta=75^\circ、72^\circ、70^\circ$ ，从而采用了 $\alpha=45^\circ、\beta=72^\circ$ 的一组，恰好达到了抗滑安全要求，允许了3.97公斤/平方公分的主拉应力。

平板坝的支墩一般为单墩，很少采用双支墩，单支墩的间距应随坝高而变，并且与施工条件及是否溢流有关，一般趋势是增加间距。下列经济总结数据可作为初选时的依据：坝高在30公尺以下时，间距 ≤ 6 公尺；坝高在30~50公尺时，间距可增至10公尺；更高的坝（50~100公尺），间距应增至18公尺。本坝曾经拟定6公尺、7.5公尺、9公尺三种支墩间